

0. 777735

На правах рукописи



Назаров Антон Александрович

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФАКЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань, 2009 г.

Работа выполнена на кафедре «Машины и аппараты химических производств» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский государственный технологический университет»

Научный руководитель -

доктор технических наук, профессор  
Поникаров Сергей Иванович

Официальные оппоненты -

доктор технических наук, профессор  
Зиятдинов Надир Низамович

доктор технических наук, профессор  
Хафизов Фаниль Шамилевич

Ведущая организация -

Волжский научно-исследовательский  
институт углеводородного сырья (г. Казань)

Защита состоится «26» июня 2009 г. в 14<sup>00</sup> час. на заседании диссертационного совета Д212.080.06 при ГОУ ВПО «Казанский государственный технологический университет» по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, КГТУ, зал заседаний Ученого совета (А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Электронный вариант автореферата размещен на сайте Казанского государственного технологического университета ([www.kstu.ru](http://www.kstu.ru)).

Автореферат разослан «26» июня 2009 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000557979

Ученый секретарь совета

С.И. Поникаров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В химических производствах перерабатывается и используется большое количество горючих и взрывоопасных веществ. Технический прогресс и резкое увеличение доли сырьевых ресурсов, вовлеченных в промышленное производство, приводят к большому количеству выбросов вредных взрывопожароопасных и токсичных веществ в атмосферу.

Одним из важных средств пожаровзрывозащиты и защиты экологии являются факельные установки, активно применяемые на многих химических, нефтехимических, нефтяных и многих других промышленных предприятиях.

Сжигание сбросных газов на факельных установках позволяет предотвратить загрязнение окружающей среды токсичными, горючими веществами, которые при этом преобразуются в экологически относительно безопасные продукты.

Разработка и совершенствование конструкции факельных систем является актуальной проблемой. Совершенствование факельных систем проводится в отношении повышения надежности источников воспламенения, средств контроля, наличия и сигнализации пламени дежурных горелок, снижении влияния ветра на стабильность горения, предотвращения попадания воздуха внутрь факельных систем, повышении полноты сжигания, повышения устойчивости работы при изменении технологических параметров, а также снижении шума и яркого свечения. Решения всех этих проблем невозможно без понимания и адекватного описания совокупности физико-химических явлений, происходящих при горении сбросных газов на факельных установках, и влияния конструктивных параметров оборудования на эти процессы. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка методов расчета и математического моделирования процессов горения на факельных установках, что позволит проектировать и создавать оптимальные конструкции факельных оголовков.

### Цели работы:

- Создание ветрозащитных экранов факельного оголовка, обеспечивающих снижение влияние ветровых потоков на процесс горения и обеспечивающих наилучшую защиту факельного оголовка от воздействия пламени.
- Создание пневматического сигнализатора пламени, обеспечивающего надежную индикацию наличия пламени дежурной горелки.

### Основные задачи исследования:

- 1) Исследование ветрозащитных устройств на эффективность защиты оголовка от воздействия пламени, по минимуму габаритов и веса.
- 2) Исследование сопел, устанавливаемых в дежурной горелке, обеспечивающих рост избыточного давления в линии топливной смеси при горении дежурной горелки.
- 3) Разработка методики выбора диаметра сопла для надежной индикации пламени дежурной горелки для смеси метан-пропан.

### Научная новизна

- Аналитическим и экспериментальным путем определены графики зависимости глубины опускания пламени на факельных оголовках от отношения скоростей обдува к скоростям истечения газа для предложенных ветрозащитных экранов.

- Аналитическим и экспериментальным путем определены графики зависимости величины избыточного давления в линии топливного газа при горении и без горения дежурной горелки от величины избыточного давления пропана на входе в блок запально-сигнализирующий для экспериментальных моделей сопел дежурной горелки.

- Экспериментальным путем определены диапазоны давлений пропана и метана на входе в блок запально-сигнализирующий, внутри которых возможен стабильный розжиг дежурной горелки без проскока и отрыва пламени.

- Экспериментальным и аналитическим путем определено сопло, позволяющее надежно фиксировать наличие пламени дежурной горелки в диапазоне давлений на входе, обеспечивающих стабильной розжиг.

- Разработана методика расчета величины избыточного давления в линии топливного газа при горении и без горения дежурной горелки при использовании смеси метан-пропан в качестве топливного газа дежурной горелки.

### **Практическая значимость**

Разработаны конструкции ветрозащитных экранов факельных оголовков и пневматический сигнализатор наличия пламени дежурной горелки (патенты РФ № 49184, № 49185, № 54655, № 56561), использование которых позволит повысить стабильность горения сбросных газов и снизить влияние пламени на факельную трубу на факельных установках и повысить надежность индикации пламени дежурных горелок.

Результаты работы были использованы при проектировании и при последующем изготовлении факельных установок для следующих объектов:

- ЗАО «Самара-Нафта»;
- ОАО «ТНК-ВР»;
- ОАО «НК «Роснефть».

### **Публикации**

Основные положения диссертационной работы изложены в 9 публикациях, 4 из которых – статьи, опубликованные в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобробразования и науки РФ на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, 4 из которых – патенты РФ на полезную модель, а также в материалах 1 научной конференции.

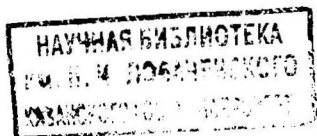
### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 113 наименований и приложений. Общий объем диссертации составляет 167 страниц, содержит 80 рисунков и 26 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Введение**

Во введении обоснованы актуальность работы, её научная и практическая значимость, сформулированы основные задачи исследования и положения, которые выносятся на защиту.





## Глава 1

В 1-й главе приведен обзор отечественных и зарубежных литературных источников по теме диссертации. Приведена классификация факельных установок. Рассмотрены конструктивные исполнения ветрозащитных экранов, газовых затворов, предотвращающих проскок воздуха внутрь факельной системы, рассмотрены существующие источники воспламенения сбросных газов и сигнализаторы наличия пламени дежурных горелок. Представлена классификация ветрозащитных экранов, газовых затворов, источников воспламенения и сигнализаторов пламени дежурной горелки. Сделан обзор по математическим моделям горения, в ходе которого выявлена применимая модель для численного решения задач турбулентного горения предварительно не перемешанных газов на факельных установках.

На основе обзора делается вывод о перспективных направлениях модернизации факельных систем, которыми являются разработка новых и модернизация старых дежурных горелок, ветрозащитных устройств, средств розжига, средства контроля, индикации и сигнализации пламени дежурных горелок.

## Глава 2

Во 2-ой главе рассматриваются основные тенденции конструирования ветрозащитных устройств факельных систем, приводятся описания новых ветрозащитных экранов. Рассматриваются схемы экспериментальных моделей, схема экспериментальной установки (рис. 4) для исследования ветрозащитных характеристик экспериментальных моделей, а также приводятся обобщающие результаты экспериментов для новых экспериментальных моделей.

На рисунках 1-3 приведены экспериментальные модели ветрозащитных устройств, проведя лабораторное исследование над которыми, становится возможным:

1) Подтверждения правильности описания математической модели предварительно не перемешанного турбулентного горения сбросных газов при боковом обдуве, описанной в Главе 4, путем сравнения результатов исследований экспериментальных моделей с математическими моделями.

2) Выбор оптимальных ветрозащитных устройств по условиям эффективности защиты оголовка от воздействия пламени, по минимуму габаритов и веса.

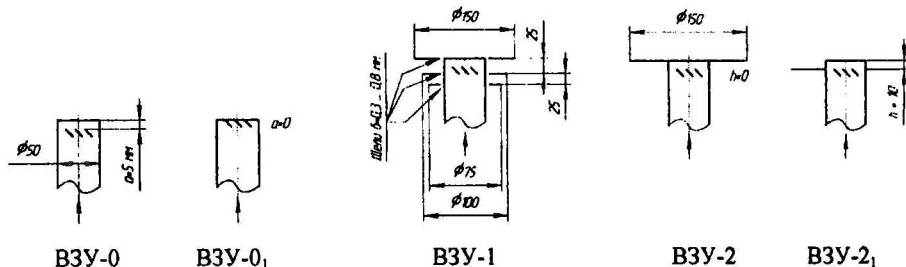


Рис. 1. Модели ветрозащитных устройств (простейшие и дисковые)

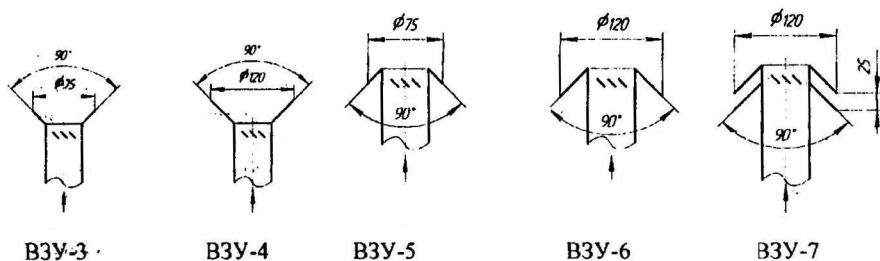
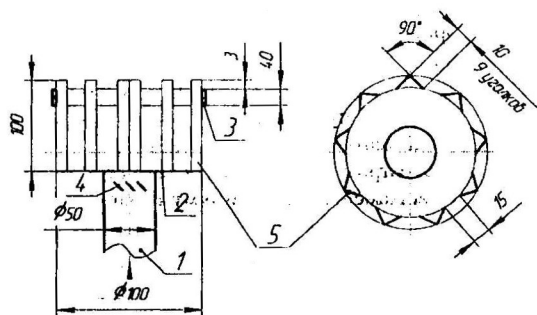


Рис. 2. Модели ветрозащитных устройств (в виде усеченных конусов)

Для проведения исследований использовалась экспериментальная установка, показанная на рисунке 4. Она состоит из исследуемого объекта – факельного оголовка 4, системы подвода газа к оголовку, системы для создания бокового ветра и системы измерения. Модели ветрозащитных устройств в процессе исследований поочередно устанавливаются на факельную трубу 4. Газ (пропан) подается из баллона 9 через отсечной кран 8, редуктор 7 и ротационный газовый счетчик 3 на штуцер 6. Боковой обдув создается вентилятором 1. Система измерения состоит из анемометра 2 и счетчика газового ротационного 3 и служит для измерения скорости газа на выходе из трубы оголовка и скорости ветра. Экспериментальные исследования проводились в диапазоне скоростей обдува от 0 до 5,5 м/с и скорости истечения газа равной 1,5 м/с.



1 – труба; 2 – днище; 3 – обечайка; 4 – лопатка; 5 – уголок  
VZU-8

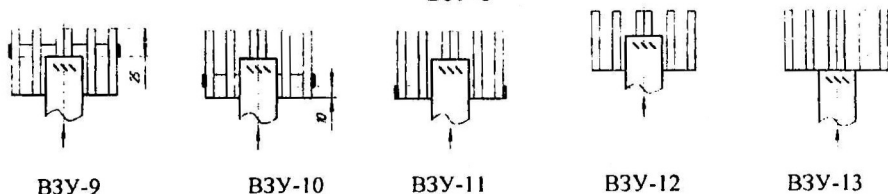
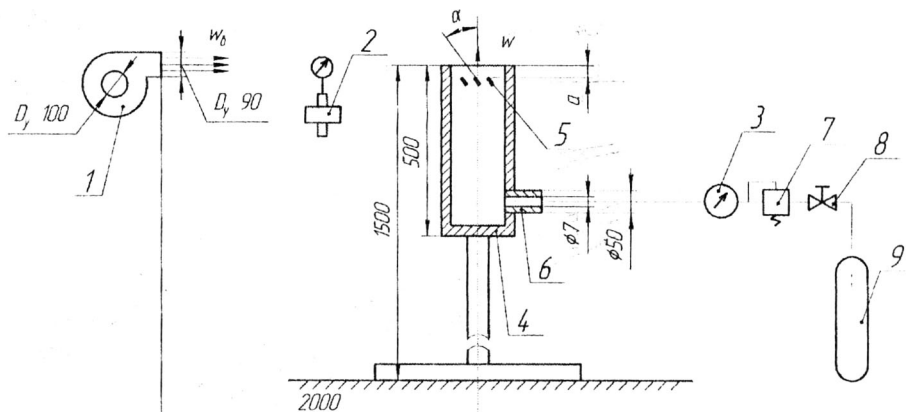


Рис. 3. Модели ветрозащитных устройств (диафрагмы)

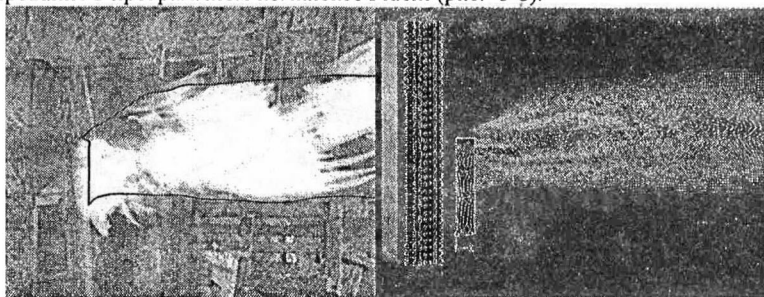


1 – вентилятор; 2 – анемометр АПР-2; 3 – счетчик газовый;  
4 – труба оголовка факела; 5 – лопатки стабилизатора; 6 – штуцер;  
7 – редуктор; 8 – кран; 9 – баллон газовый (пропан);  
Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Далее в данной главе представлены результаты исследований в виде:

1) фотографий пламени (рис. 5), полученных при различных отношениях скоростей обдува боковым ветром к скорости истечения факельного газа из моделей факельных оголовков с различными ветрозащитными устройствами и нанесенными на них изолиниями температуры свечения продуктов реакции, полученными при моделировании в программном комплексе Fluent (Глава 4).

2) Графиков глубины опускания пламени в зависимости от отношения скоростей обдува к скорости истечения факельного газа для экспериментальных моделей ветрозащитных устройств, полученных экспериментальным путем и путем моделирования в программном комплексе Fluent (рис. 6-8).



ВЗУ-0 ( $W_{обд}=5,5$  м/с,  $W_{истеч}=1,5$  м/с,  $W_{обд}/W_{истеч}=3,68$ )

Черный контур - изолиния при температуре 873 °К

Рис. 5

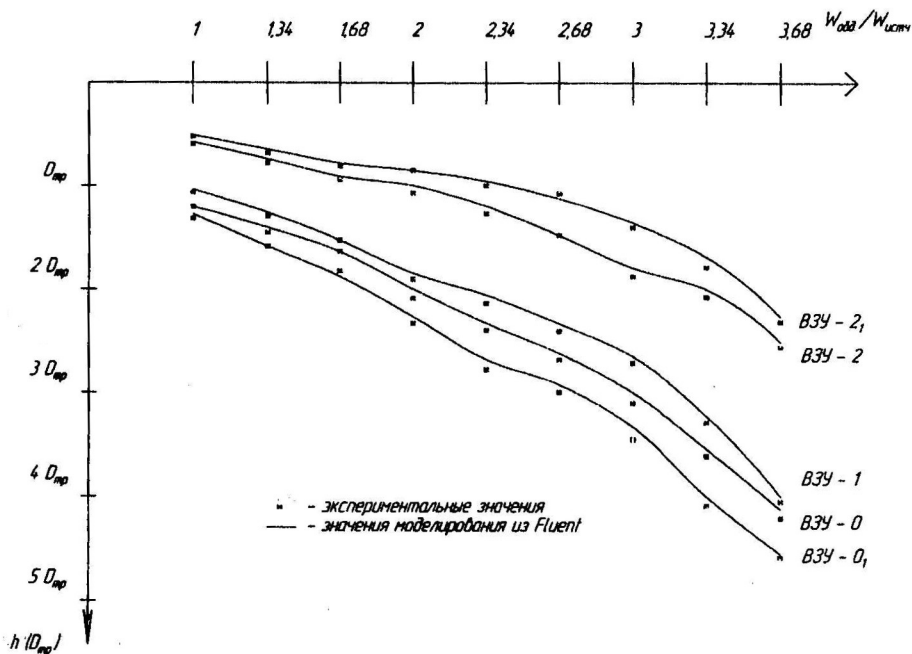


Рис. 6. Зависимость глубины опускания пламени от отношения скорости обдува к скорости истечения газа для моделей ВЗУ 01-21.

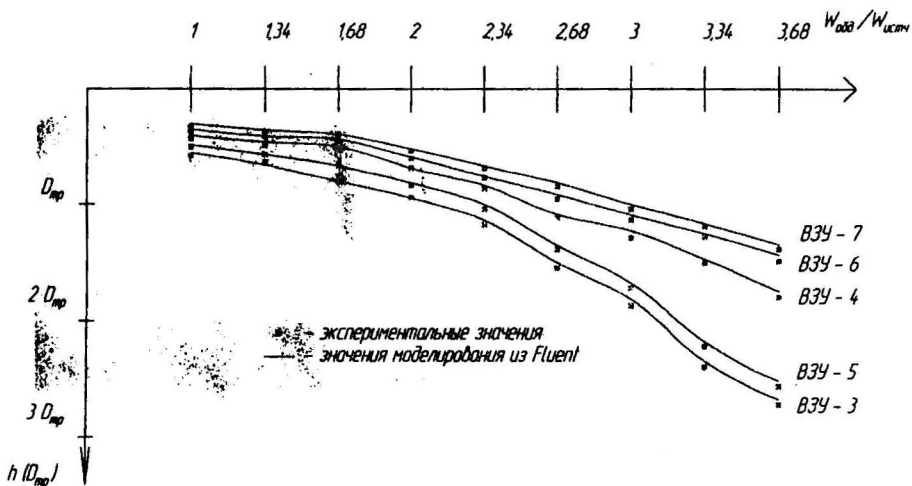


Рис. 7. Зависимость глубины опускания пламени от отношения скорости обдува к скорости истечения газа для моделей ВЗУ 3-7.

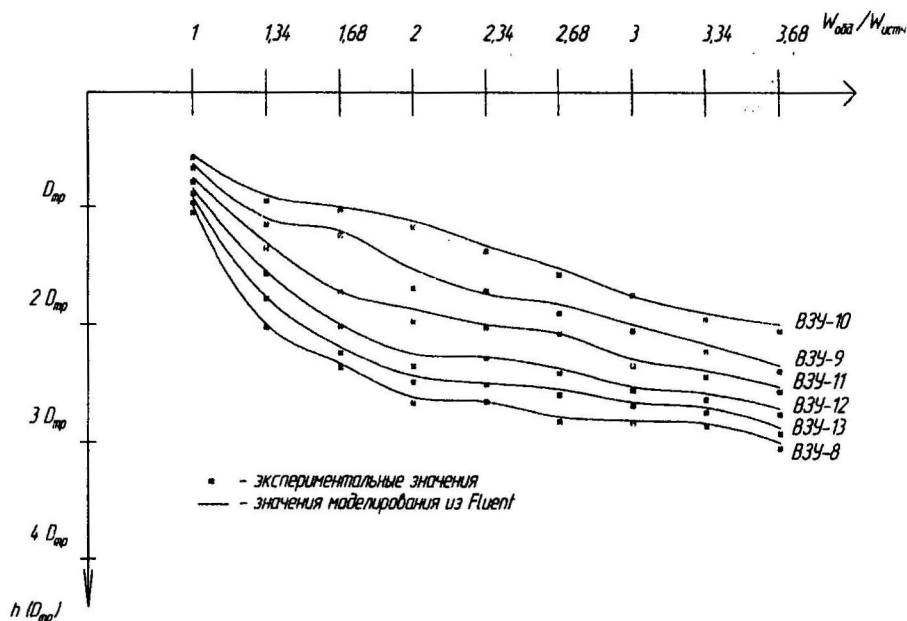


Рис. 8. Зависимость глубины опускания пламени от отношения скорости обдува к скорости истечения газа для моделей ВЗУ 8 – 13

### Глава 3

В 3-ей главе рассматриваются основные тенденции конструирования средств контроля, сигнализации и индикации пламени дежурных горелок факельных систем, приводятся описания перспективных средств контроля, сигнализации и индикации пламени дежурных горелок. Рассматриваются схемы экспериментальных моделей, схема экспериментальной установки для исследования средств контроля, сигнализации и индикации пламени дежурных горелок, приводится аналитическая методика исследования предложенных экспериментальных моделей, а также приводятся обобщающие результаты экспериментов для новых экспериментальных моделей.

На рисунке 9 показана предложенная модель сигнализатора пламени дежурной горелки, представляющая собой дежурную горелку, с поочередно устанавливаемыми в неё экспериментальными моделями сопел, проводя исследования над которыми, становится возможным:

1) Определение зависимости величины избыточного давления в линии топливного газа при горении и без горения дежурной горелки от величины избыточного давления газа на входе в блок запально-сигнализирующий для экспериментальных моделей сопел.

2) Экспериментальное определение диапазона давлений на входе в блок запально-сигнализирующий, внутри которого возможен стабильный розжиг дежурной горелки без проскока и отрыва пламени.

3) Выбор сопла, создающего наибольшую разность давлений при горении и без горения дежурной горелки в линии топливного газа, внутри диапазона давлений при которых возможен стабильный розжиг, позволяющего в данном диапазоне входных давлений использовать единой настройкой реле перепада давления для выдачи сигнала наличия пламени дежурной горелки.

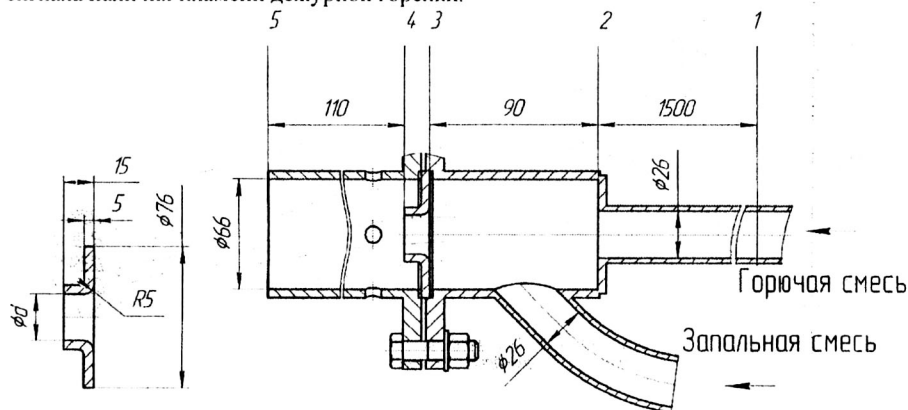
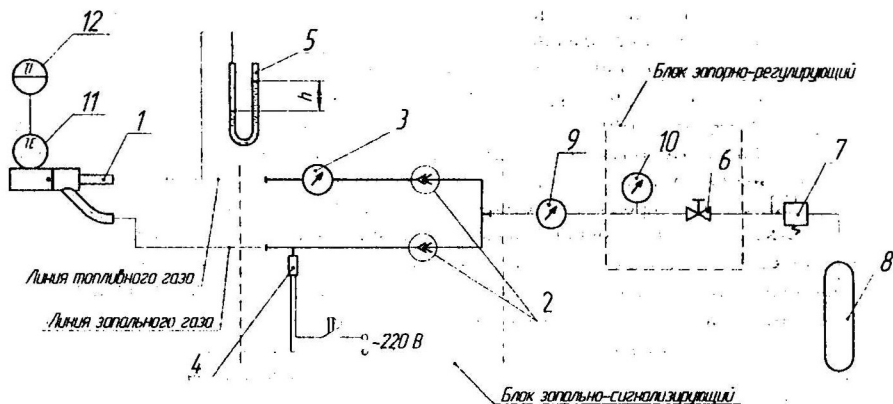


Рис. 9. Модель сигнализатора пламени дежурной горелки

Для исследования сигнализатора пламени было изготовлено 6 моделей экспериментальных сопел (рис. 9), с условными проходными диаметрами  $d = 20; 22; 24; 26; 28; 30$  мм.

Для проведения испытаний использовалась экспериментальная установка, показанная на рисунке 10. Она состоит из исследуемого объекта – горелки дежурной 1 с поочередно устанавливаемыми соплами, системы подготовки и поджога горючей смеси, представляющей собой блок запально-сигнализирующий, блока запорно-регулирующего, в котором регулируется давление газа на вход, редуктора, газового баллона, газовых счетчиков и термодары с измерителем температуры. Газ (пропан) подается из баллона 8 через редуктор 7 в блок запорно-регулирующий, где фиксируется давление газа при помощи показывающего манометра 10. После блока запорно-регулирующего газ проходит газовый ротационный счетчик 9 и поступает на вход блока запально-сигнализирующего, где газовый поток делится на два потока и при помощи эжекторов 2 готовится горючая газо-воздушная смесь. На линии топливной смеси установлен ротационный газовый счетчик 3 и U-образный манометр 5 для измерения расхода топливной смеси и величины избыточного давления в линии топливного газа. В линии запального газа установлена индукционная свеча 4, с помощью которой производится поджог запальной смеси, которая в свою очередь разжигает газ, поступающий по линии топливного газа. Температура стенки дежурной горелки измеряется при помощи термодары 11 и измерителя температуры 12.



1 – дежурная горелка с исследуемым соплом; 2 – эжектора; 3, 9 – счетчики газовые Г6РЛ; 4 – свеча индукционная; 5 – U-образный водяной манометр; 6 – кран; 7 – редуктор; 8 – баллон газовый (пропан); 10 – показывающий манометр; 11 – термопара; 12 – измеритель температуры;

Рис. 10. Схема экспериментальной установки

Аналитический расчет величины избыточного давления при горении и без горения дежурной горелки производится для сечения 1 (рис. 9), сечение 1 является местом присоединения U-образного манометра при проведении исследований. Исходными данными являются расход и давление газа на вход в блок запально – сигнализирующий и температура наружной стенки дежурной горелки, полученные в ходе экспериментального исследования. Избыточное давление в сечении 1 (рис. 9) определяется как сумма давления потерянного при истечении струи в сечении 5, потерь давления на преодоления местных сопротивлений (внезапное расширение, внезапное сужение) 2, 3, 4 и потери давления на трение в трубопроводе между сечениями 1-2:

$$\Delta P_1 = \frac{\rho^* w_5^2}{2} + \zeta_4 \frac{\rho^* w_4^2}{2} + \zeta_3 \frac{\rho^* w_3^2}{2} + \zeta_2 \frac{\rho^* w_2^2}{2} + \zeta_1 \frac{\rho^* w_1^2}{2} \quad (1)$$

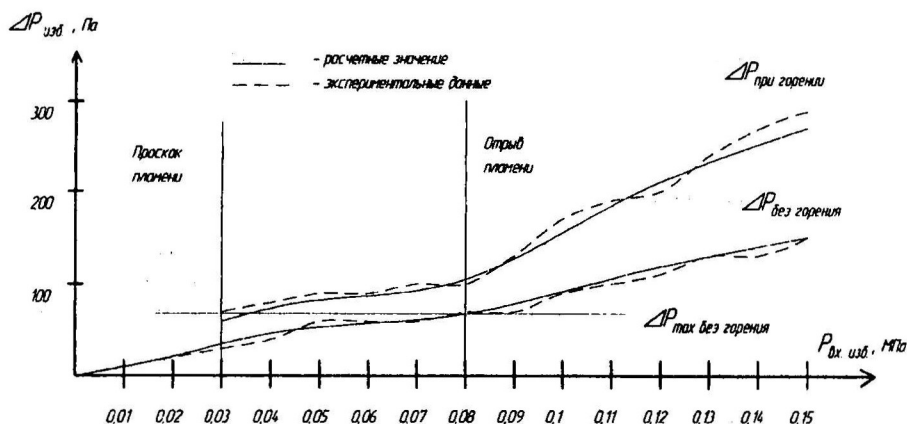
Потери на трение на участках между сечениями 4-5, 3-2 учитывать не будем.

При расчете величины избыточного давления для сечения 1, без горения дежурной горелки, в формуле 1 скорости и плотности для сечений принимаются для исходного топливного газа при температуре окружающей среды. В случае горения дежурной горелки, скорости и плотности для сечений 1, 2 принимаются для исходного топливного газа при температуре окружающей среды, а для сечений 3, 4 и 5 – для продуктов горения при средней температуре продуктов горения. Температура продуктов горения определяется составлением теплового баланса. Физико-химические параметры газа и продуктов реакции определяются по таблицам в специальной литературе. Температуры продуктов горения приведены в Приложении 3 данной работы.

Результаты аналитического и экспериментального исследования приведены в виде графиков зависимости избыточного давления в линии топливного газа от

избыточного давления на вход в блок запально-сигнализирующий для каждой экспериментальной модели сопла (рис. 11).

В ходе исследований моделей сопел дежурной горелки на пропане было установлено, что температура наружной стенки дежурной горелки, а как следствие и температура продуктов горения, не зависят от диаметра проходного сечения исследуемых сопел. Поэтому используя метан в качестве топливного газа, можно пользоваться значениями температуры наружной стенки дежурной горелки, полученной на метане для сопла с проходным сечением 28 мм, приведенными в Приложении 4 данной работы. Расчет избыточного давления в линии топливного газа на смеси метан-пропан в качестве газа, в зависимости от концентрации одного из компонент в данной смеси производится аналогично расчету для пропана, приведенного выше. Температуру продуктов реакции смеси метан-пропан можно представить в виде линейной зависимости от концентрации метана в смеси метан-пропан, которую можно определить используя значения температуры продуктов реакции чистого метана и чистого пропана, приведенных в Приложениях 3,4 данной работы.



Экспериментальная и расчетная зависимости избыточного давления в линии топливного газа от избыточного давления на вход в блок запально-сигнализирующий (модель сопла с проходным сечением диаметром 20 мм)

Рис. 11

## Глава 4

В 4-ой главе описывается математическая модель турбулентного горения предварительно не перемешанных газов и метод её численного решения.

Данная модель включает в себя следующие уравнения:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho w_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho w_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho w_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$



Систему уравнений баланса количества движения по каждой из трех осей координат:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= \rho \left( w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} \right), \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= \rho \left( w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} \right), \\ -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} &= \rho \left( w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение переноса концентраций компонент:

$$\frac{\partial(\rho w_x Y_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y Y_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z Y_i)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_{eff}}{Sc} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_{eff}}{Sc} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{eff}}{Sc} \frac{\partial Y_i}{\partial z} \right) + R_i \quad (4)$$

Уравнениями переноса энергии:

$$\frac{\partial(\rho w_x h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y h)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z h)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu^* C_p}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu^* C_p}{Pr} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu^* C_p}{Pr} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_{ch} + S_r \quad (5)$$

Уравнения удельной теплоемкости смеси, уравнение связывающее температуру и локальное значение энтальпии.

Для описания турбулентных характеристик течения используется модифицированная к-ε модель турбулентности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w_x k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z k)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho w_x \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z \varepsilon)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

Эмпирические константы принимались:  $C_\mu = 0,09$ ,  $\sigma_k = 1,0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ,  $C_1 = 1,43$ ,  $C_2 = 1,92$ .

Процесс теплообмена при горении факела представляет из себя сложное конвективно-радиационное взаимодействие между газовыми средами в условиях неизотермичности, сложной аэродинамики вблизи факельного оголовка и горения сбросного газа. Преобладание радиационного теплообмена обусловлено высоким температурным уровнем газовой среды, поэтому решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на модели радиационного теплообмена «P1 Radiation Model» (уравнение 7).

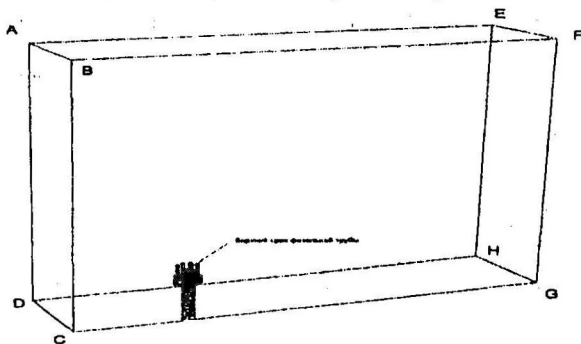
Для определения кинетики горения газового топлива используется модель «Eddy Dissipation Model», которая была разработана для описания турбулентных пламен, скорость горения в этой модели ограничивается скоростью турбулентного перемешивания топлива и окислителя. Скорость образования  $R_{i,r}$  компонентов  $i$  в реакции  $r$  определяется меньшим значением двух уравнений (уравнения 8,9).

$$\begin{aligned}
 (\alpha_g + \alpha_s)E_r &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{3(\alpha_g + \alpha_s + \varepsilon\beta_s)} \frac{\partial E_r}{\partial x} \right) + \sigma_0(\alpha_g T_g^4 + \alpha_s T_s^4) \\
 (\alpha_g + \alpha_s)E_r &= \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{3(\alpha_g + \alpha_s + \varepsilon\beta_s)} \frac{\partial E_r}{\partial y} \right) + \sigma_0(\alpha_g T_g^4 + \alpha_s T_s^4) \\
 (\alpha_g + \alpha_s)E_r &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{3(\alpha_g + \alpha_s + \varepsilon\beta_s)} \frac{\partial E_r}{\partial z} \right) + \sigma_0(\alpha_g T_g^4 + \alpha_s T_s^4)
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left( \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right) \tag{8}$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \left( \frac{\sum_p p Y_p}{\sum_j v'_{j,r} M_{w,j}} \right) \tag{9}$$

Далее в данной главе приводится расчетная область, обоснование выбора начального размера ячеек, а также приводятся граничные условия :



Расчетная область

Рис. 12

На входном сечении ABCD (рис. 12) задавались скорости ветрового потока, его направление и значения параметров турбулентности, а также массовая доля  $O_2$ . Приблизительные значения естественной интенсивности и масштаба турбулентности принимались 0.1 % и 0.1 м, соответственно. Профиль скоростей принимался неизменным. Направление ветра принималось перпендикулярным к грани ABCD. Массовая доля  $O_2 = 0,23$ . Температура обтекающего потока ветра принималась равной 293 К.

На сечении верхнего среза факельной трубы задавалась скорость истечения газа, направление и значения интенсивности турбулентности и гидравлического диаметра, также массовая доля  $C_3H_8$ . Направление истечения газа принималось перпендикулярным к верхнему срезу факельной трубы. Приблизительные значения интенсивности турбулентности и гидравлического диаметра принимались 0,3 % и 0,05 м, соответственно. Массовая доля  $C_3H_8 = 1$ . Температура газа принималась равной 293 К.

На границе CBFG ставилось условие симметрии, то есть равенство нулю нормальной к границе компоненты скорости и нормальных производных остальных переменных  $\partial\Phi/\partial n = 0$ .

На выходном сечении EFGH фиксировалось нулевое избыточное давление.

Для условий лабораторного помещения (проводился в помещении) на боковой грани (стена) ADHE, верхней грани (потолок) ABFE и нижней грани (пол) CDHG ставились условия прилипания, то есть равенство нулю компонентов скорости.

Также задавались физико-химические свойства всех компонентов ( $C_3H_8$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ): плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность, вязкость, молекулярный вес, начальная энтальпия.

Исследования проводились для каждой экспериментальной модели ветрозащитного устройства в диапазоне скоростей обдува от 0 до 5,5 м/с и скорости истечения газа равной 1,5 м/с.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1) Проведено экспериментальное и аналитическое исследование различных ветрозащитных устройств, в ходе которых получены графики зависимости глубины опускания пламени от верхнего среза факельного ствола от отношения скорости обдува к скорости истечения газа.

2) Установлено, что наиболее простыми и достаточно надежными из предложенных ветрозащитных устройств является ветрозащитное устройство в виде конического экрана, расширяющегося вниз с углом раствора  $90^\circ$  и с диаметром равным 2,4 диаметра факельной трубы.

3) Приведено новое запально-сигнализирующее устройство, представляющее собой дежурную горелку факельной системы, в ходе исследований которой получено, что основной вклад в увеличение избыточного давления в линии топливной смеси при горении вносит увеличение значений температуры среды (продуктов реакции) в дежурной горелке.

4) Аналитическим и экспериментальным путем получены графики зависимости избыточного давления в линии топливной смеси при горении и без горения дежурной горелки от различных избыточных давлений пропана на входе в блок запально-сигнализирующий.

5) Экспериментальным путем установлен диапазон избыточного давления пропана на входе в блок запально-сигнализирующий, при котором происходит стабильный розжиг дежурной горелки без проскоков и отрывов пламени, который равен 0,03-0,08 МПа, диапазон избыточного давления метана – 0,03-0,09 МПа.

6) Экспериментальным и аналитическим путем определено сопло, позволяющее надежно фиксировать наличие пламени дежурной горелки в диапазоне давлений пропана, на входе, обеспечивающих стабильной розжиг дежурной горелки. Им является экспериментальная модель сопла, диаметр внутреннего сечения которого равен 28 мм.

**Основное содержание работы изложено:**

- в статьях, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. Магарил Я.Ф. ФАКЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ. Сигнализатор пламени / Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, В.И. Панченко, Я.С. Шпанер, Е.А. Зинкичев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – № 12. – с. 16.

2. Магарил Я.Ф. ФАКЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ. Ветрозащитные устройства / Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, В.И. Панченко, Я.С. Шпанер, Е.А. Зинкичев, С.И. Поникаров // Безопасность жизнедеятельности. – 2008. – № 4. – с. 13-17.

3. Магарил Я.Ф. ФАКЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ. Специальные оголовки факельных установок / Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, Я.С. Шпанер, Р.Г. Гимранов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 1. – с. 17.

4. Магарил Я.Ф. Аэродинамические газовые затворы для факельных установок / Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, Я.С. Шпанер, Р.Г. Гимранов, В.И. Панченко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 5. – с. 14-15.

- в сборниках научных статей и патентах:

5. Пат. на полезную модель № 49184 Российская Федерация, МПК F23Д 14/38. Оголовок факельной установки/ Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, В.И. Панченко, Я.С. Шпанер и др. - опубл. 10.11.2005г. Бюл. №31.

6. Пат. на полезную модель № 49185 Российская Федерация, МПК F23Д 14/38. Оголовок факельной установки/ Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, В.И. Панченко, Я.С. Шпанер и др. - опубл. 10.11.2005г. Бюл. №31.

7. Пат. на полезную модель № 54655 Российская Федерация, МПК F 23 D 14/38. Оголовок факельной установки/ Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, В.И. Панченко и др. - №2006104609/22; завл. 06.02.2006, опубл. 06.02.2006, Бюл. №19. – 3 с.:ил.

8. Пат. на полезную модель № 56561 Российская Федерация, МПК F 23 N 5/24. Устройство для контроля факела/ Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, В.И. Панченко и др. - №2006115677/22; завл. 27.04.2006, опубл. 10.09.2006, Бюл. №25. – 4 с.:ил.

9. Назаров А.А. Ветрозащитные устройства факельных систем / А.А. Назаров, Я.Ф. Магарил, В.И. Панченко, Я.С. Шпанер, Е.А. Зинкичев, С.И. Поникаров // Материалы Второй Всероссийской студенческой Научно-технической конференции «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология». – Казань, 2008. – С. 332-338.

Соискатель



Назаров А.А.

Заказ

142

Тираж 80 экз.

Офсетная лаборатория Казанского государственного технологического университета  
420015, Казань, К.Маркса, 68